

IBAD-MgO 二軸配向膜における配向度の膜厚依存性と表面粗さ - 配向過程における臨界膜厚 -

Thickness Dependence of In-plane Grain Alignment and Surface Roughness of IBAD-MgO Biaxially-textured Films; Critical Thickness in Texturing Process

宮田 成紀, 衣斐 颯, 島山 英之, 和泉 輝郎, 塩原 融 (超電導工学研究所),
加藤 丈晴, 平山 司 (ファインセラミックスセンター)

MIYATA Seiki, IBI Akira, HATAKEYAMA Hideyuki, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL-ISTEC);
KATO Takeharu, HIRAYAMA Tsukasa (JFCC)
E-mail: miyata@istec.or.jp

REBa₂Cu₃O_{7-d}(REBCO)高温超電導線材の開発において、二軸配向基板の配向度は臨界電流特性に直接影響することからもっとも重要なファクターのひとつである。我々のグループで現在採用している基板(線材)構造は REBCO / CeO₂ (500nm) / LaMnO₃ (5-30nm) / IBAD-MgO (<10nm) / Gd-Zr-O (110nm) / Ni-alloy であり、典型的な配向度の値は CeO₂ 層において法線配向度 $\Delta\omega \sim 2^\circ$ 、面内配向度 $\Delta\phi \sim 3-4^\circ$ 、超電導層において $\Delta\omega < 2^\circ$ 、 $\Delta\phi \sim 3^\circ$ などとなっている。しかし、このような高い配向度を得るために CeO₂ 層において 500nm 程度の層厚が必要となっており、プロセスの量産化に向けた製造速度の向上という目的に対しての妨げとなっている。CeO₂ 層は IBAD による二軸配向基板上にエピタキシャル成長させた場合、その配向度が膜厚とともに減少していき性質を持っているが、膜厚以外に配向性を制御する方法はまだ確立されておらず、したがって CeO₂ プロセスの高速化を目指すためには出発点となる LaMnO₃(LMO)層以下の配向度を向上させることが必要となる。LMO 層の役割は文字通り上下層に対するバッファ層であり、結局 CeO₂層以下における配向度を向上させるためには IBAD-MgO 層の配向度を改善する必要がある。

Fig.1 に IBAD-MgO 層の成膜時間に対する二軸配向基板の配向度(上記構造における CeO₂ 層(220)反射により評価した面内配向度 $\Delta\phi$)の変化を示す。基板の配向度は IBAD-MgO の成膜時間に関して、初期の段階では減少するが、ある時点で最小値を示した後、より長時間では増大する傾向を示す。Fig.2 は $\Delta\phi$ の増大が始まる付近について、原子間力顕微鏡(AFM)により直接 IBAD-MgO 表面を観察した結果である。より短いスケールの構造を議論するため、 $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ の測定データから抽出した長さ $L (= 0.1\mu\text{m})$ のデータ列について二乗平均平方根 $w(L) = \left([h_i - \langle h \rangle]^2 \right)^{1/2}$ をとり表面粗さとした(h_i は高さ関数、 $\langle \dots \rangle$ は平均を表す)。配向度の劣化が始まる 60sec 付近で表面粗さが急激に増大していることがわかる。この IBAD-MgO 膜表面の変化を、異なるアシスト電流値に対して系統的に調べたところ、いずれにおいても表面粗さ(w 値)の増大が確認され、全体としてプロファイルは長時間側へシフトする傾向が見られた。これは、より強いアシスト電流に対してはエッチングの効果が顕著になり、成膜レートが減少するためであると考えられる。一方、配向度についても同様に全体のプロファイルはアシスト電流値の増加に対して長時間側へシフトする傾向を見せ、その劣化の開始とラフネスの増大がおおよそ一致していることが確認された。さらにそれぞれのアシスト条件に対する成膜レートを評価し、膜厚に換算したところそれらがすべて同じ約 4nm の膜厚で起こっていることがわかった。この膜厚は、平面 TEM 観察において初期段階にアモルファス状態にあった MgO 膜中に結晶化領域が急速に拡がり、ほぼ全面の結晶化が完了すると報告されている値に近い[1]。表面粗さの増大がこの膜全面の結晶化の完了に関連付けられるとすれば、結晶化が完了した時点で配向度の向上は終了し、それ以降配向度が向上することはないという

解釈が成り立つ。さらに配向度はこの臨界的な膜厚直下で最小となることから、配向度の向上に繋がる結晶粒の選別はこの時点で最も効果的に行われていると予想され、その状態(臨界膜厚直下)に長時間保持することによって配向度がより向上することが期待できる。そこで成膜を二段階に分け、臨界膜厚直下においてアシスト電流値を増加させ、成膜レートを下げて成膜を行った試料について配向度を評価したところ、我々のグループにおいて最小の面内配向度($\Delta\phi = 2.2^\circ$)を得ることができた。今後は更なる条件の最適化と、長尺プロセスへの適用を進めていく予定である。

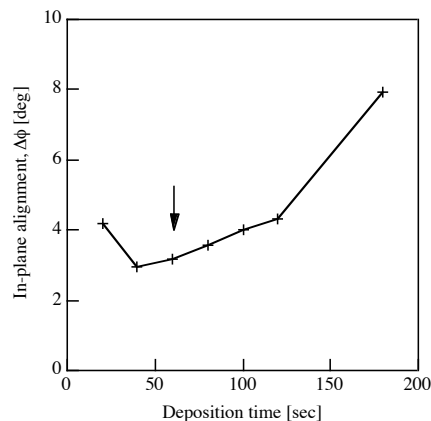


Fig. 1 In-plane grain alignments ($\Delta\phi$ s) of IBAD-MgO-based substrates with respect to the deposition time of IBAD-MgO. $\Delta\phi$ values were evaluated by CeO₂ (220) reflections.

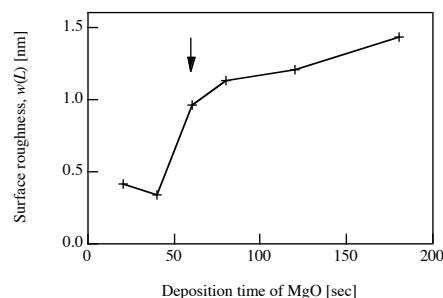


Fig. 2 The time evolution of the surface roughness $w(L=0.1\mu\text{m})$ of the IBAD-MgO film. An abrupt increase is found at 60 seconds (thickness ~ 4 nm), which corresponds to the beginning of degradation in the in-plane grain alignment $\Delta\phi$ of the biaxial substrate.

試料作製および評価において協力いただいた栗木礼二氏、青木大志氏に感謝いたします。本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により実施したものです。

[1] R. T. Brewer and H. A. Atwater: Appl. Phys. Lett. **80** (2002) 3388.

幅広 PLD プロセスによる大電流ケーブル用 GdBCO 線材の開発 Development of GdBCO coated conductors for HTS cables by large area PLD process

阿比留 健志, 小西 昌也, 新海 優樹, 大松一也(住友電工)
ABIRU Kenji, KONISHI Masaya, SHINGAI Yuki, OHMATSU Kazuya (SEI)
E-mail: abiru-kenji@sei.co.jp

1. はじめに

Re(希土類)系高温超電導体は磁場中での臨界電流(I_c)特性に優れており、超電導マグネット、SMES、電力ケーブルなど様々な機器への応用が期待されている。住友電工では大電流・低交流損失を特徴とする超電導ケーブルの開発を行っており、そのための線材の研究開発と製造を進めている。ケーブル開発用線材の供給を確実にし、ケーブルの技術開発を促進するためには、線材の特性向上と成膜速度の高速化を図り、歩留まり良く線材を製造できる作製プロセスが必要不可欠である。

これまで、我々は1cm当たりの成膜速度の向上を図るため、30mm幅の低磁性クラッド金属基板上での中間層の開発を行い、幅方向に均一な中間層を作製することに成功している[1]。今回、新規導入したPLD用300Wレーザを使用し線材開発を行い、 I_c 特性の向上に成功したので報告する。

2. 実験

30mm幅低磁性クラッド金属基板上にRFスパッタ法でCeO₂/YSZ/CeO₂の3層構造からなる中間層を成膜し、PLD法によりGdBCO超電導層の成膜を行った。さらに、DCスパッタ法により超電導層の表面にAg安定化層を蒸着し、酸素熱処理をして超電導線材を作製した。超電導層は新規導入した高出力300Wレーザを使用し成膜を行い、旧200Wレーザを用いて作製した線材との I_c 特性の比較を行った。Fig. 1に新規導入したPLD用300Wレーザの写真を示す。成膜時の線速は共に12m/hであり、発振周波数は新レーザが300Hz、旧レーザが180Hzとした。 I_c 特性は1 μ V/cmを閾値として、液体窒素中で直流四端子法により評価を行った。

3. 結果および考察

Fig. 2に新レーザによるレーザ光をターゲット上に照射した場合のプラズマの様子を示す。基板はターゲット上をReel to Reelで搬送され、ターゲット上にある30mm幅のスリットを通して基板上へ超電導層が成膜される。

Fig. 3に旧レーザと新レーザを使用し、線速12m/hで超電導層を4層成膜した場合の I_c 分布を示す。Left, Center, Rightは30mm幅線材の左側、中央、右側の10mm分にそれぞれ対応している。Fig. 3より、新レーザの導入により線材の I_c が全体的に向上し、平均して1.4~1.5倍増大していることが分かる。これは、レーザの最大発振周波数が300Hzへと向上し、1層成膜当たりの膜厚が増加したことに起因している。さらに成膜時の線速を倍の24m/hにし、8層成膜(線速12m/hで4層積層した場合と同じ膜厚)すると、線材の中央部分で400A/cmの I_c を得ることに成功した。今後はさらなる I_c 向上と成膜速度の高速化に向け、成膜時の線速と成膜温度条件の最適化を図ると共に、ケーブル用線材の製造を進めていく。

謝辞

本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術開発業務の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により実施したものである。新レーザの導入に際しては超電導工学研究所殿からのご支援を頂き、謝意を表します。



Fig.1 Photograph of newly installed 300W laser.

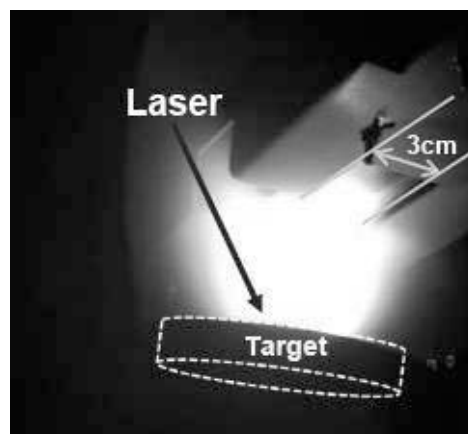


Fig. 2 Photograph of the plume expansion on the target in PLD process.

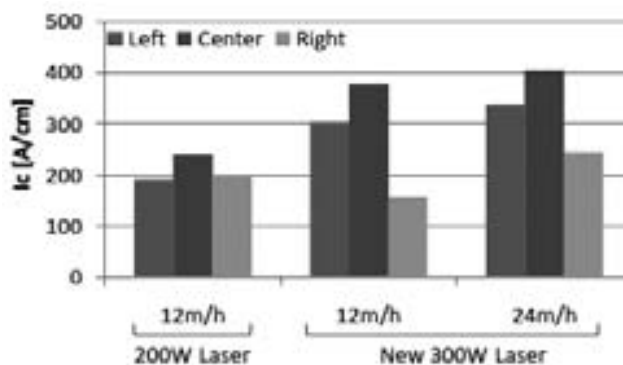


Fig. 3 I_c distribution of 30mm wide sample fabricated by PLD method using the old 200W laser and the new 300W laser.

参考文献

- H. Ota, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p. 190

大電流ケーブル用薄膜超電導線材の素線化プロセスの開発

Development of superconducting wire process for the large current cable

新海 優樹, 小西 昌也, 阿比留 健志, 大松 一也 (住友電工)
 SHINGAI Yuki, KONISHI Masaya, ABIRU Kenji, OHMATSU Kazuya (SEI)
 E-mail: shingai-yuuki@sei.co.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_x 系超電導線材(薄膜超電導線材)は、電力ケーブルやコイル、またそれらを用いた機器等、幅広い分野への応用が期待されている。我々は、薄膜超電導線材を電力ケーブルに応用することを目的として、低損失・大電流モデルケーブルに用いるための線材開発を行っている。

モデルケーブル作製のためには、大量の超電導線材の素線が必要である。そこで、我々は基板の幅広化による超電導線材のスルーット向上を行ってきた[1]。また、スルーットの向上だけでなく歩留まりを向上させるため、超電導素線の安定製造プロセスの開発も行ってきた。

本報告ではケーブル用超電導線材素線の安定製造プロセスと、作製したケーブル用超電導素線の特性について報告する。

2. 超電導素線作製プロセス

超電導線材作製プロセスを表 1 に示す。線材構成は、低磁性クラッド配向金属基板、RF スパッタリング法により作製された CeO₂/YSZ/CeO₂ 中間層、PLD 法により作製された GdBa₂Cu₃O_x 超電導層、銀安定化層からなっており、安定化層成膜後に酸素導入処理を行っている。

線材は酸素導入工程まで 3cm 幅で製造されている。酸素導入後、スリッターによりケーブルの各種要素開発用に 2mm 幅もしくは 4mm 幅に細線加工している。

銅保護層は電気めっき法により作製している。めっき保護層の厚みは片面 10~20 μm で、めっき後に端末の断面観察を行い、めっき保護層の厚みと幅方向端部保護層でしっかりと覆われているかを確認している。

めっき後、素線の Ic 分布特性、機械特性を評価し、外観検査工程を経た後、切り分け工程にて低 Ic 部分や外観不良部分を取り除き、ケーブル用線材として供給している。

3. ケーブル用素線の特性

Fig.1 に素線の断面像を示す。幅方向端部はスリットにより僅かに変形しているが、銅保護層が線材の全外周に亘って綺麗に形成されていることが確認できる。

Fig.2 に作製した 2mm 幅超電導素線の典型的な長手方向の Ic 分布を示す。ケーブル要素技術開発用に供給された超電導素線は Ic の局所的な低下等もなく、長手に渡り均一な Ic 分布を持った素線であることが分かる。

4. まとめ

超電導素線の安定製造プロセス開発と Y 系ケーブル要素技術開発用として供給している素線の特性について報告した。3cm 幅プロセスで製造しているケーブル用素線は外観に欠陥等がなく、長手方向に均一な Ic を持っていることが確認できた。今後は、66kV-5kA の容量を有す低損失・大電流モデルケーブル用素線としての必要特性を確認すると共に、さらなるスルーット向上や製作歩留まり向上の安定製造条件を確立していく。

参考文献

- H. Ota, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.190

Table 1 Process of superconducting wire

順番	工程	方法
1	基板	—
2	中間層作製	RFスパッタリング法
3	超電導層作製	PLD法
4	銀安定化層作製	DCスパッタリング法
5	酸素導入	高酸素雰囲気中での熱処理
6	細線化	スリット
7	保護層作製	電気めっき法
8	Ic測定、外観検査	連続Ic測定装置、目視検査
9	欠陥部の除去	—

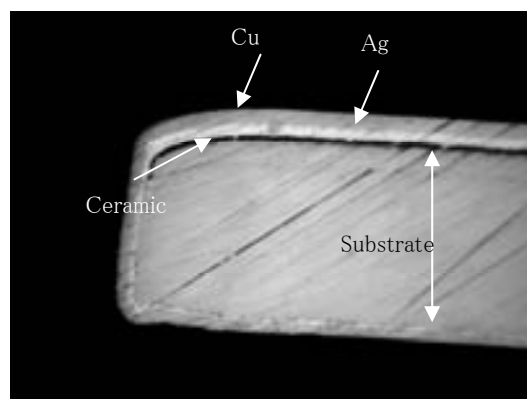


Fig.1 A cross-sectional image of the superconducting wire

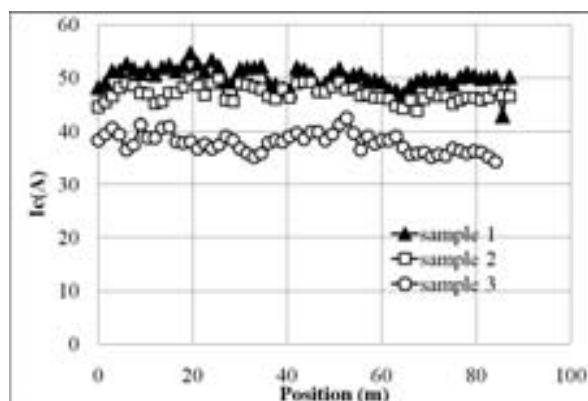


Fig.2 Ic distributions of the superconducting wire

謝辞

本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術開発業務の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により実施したものである。

また、当社の超電導線材へ酸素導入処理を行っていただいております、ISTEC-SRLの関係者各位に感謝いたします。

RE123 長尺線材の臨界電流特性と製造歩留りの向上

Improvement of critical current properties and manufacturing yields for long RE123 coated conductors

五十嵐 光則, 柿本 一臣, 羽生 智, 須藤 泰範, 竹本 哲雄, 林田 知朗, 花田 康, 中村 直識, 菊竹 亮, 朽網 寛,
飯島 康裕, 齊藤 隆(フジクラ)

IGARASHI Mitsunori, KAKIMOTO Kazuomi, HANYU Satoru, SUTOH Yasunori, TAKEMOTO Tetsuo, HAYASHIDA Tomoaki,
HANADA Yasushi, NAKAMURA Naonori, KIKUTAKE Ryo, KUTAMI Hiroshi, IJIMA Yasuhiro, SAITOH Takashi (Fujikura Ltd.)

E-mail : m.igarashi@fujikura.co.jp

1. はじめに

量産が困難であった RE123 薄膜超電導線材であるが、線材開発の著しい進展により、最近では臨界電流(I_c)200 A/cm 程度を有する数 100 m 長の線材がいくつかの機関で作製されるようになってきた。フジクラでは、一貫して IBAD/PLD 法による開発を行っているが、生産のボトルネックであった IBAD 中間層作製プロセスにおいて MgO の高配向化技術に成功し、量産化への目処が立ってきている。また中間層基板の作製技術に加え、PLD 法における $Gd_1Ba_2Cu_3O_y$ (GdBCO) 超電導層の成膜条件の最適化により、コンスタントに作製可能な線材の I_c スペックも上昇してきている。そこで今回は高特性線材の作製と線材作製歩留の向上について報告する。

2. 実験方法

IBAD-GZO と IBAD-MgO という 2 種類の間層基板を作製した^[1]。IBAD 中間層上には PLD 法により CeO_2 を線速 60 m/h で約 500 nm 成膜した。 CeO_2 の配向度は $\Delta\phi = 4 \sim 5^\circ$ であった。上記基板へ Reel-to-reel の大型 PLD 装置により GdBCO 超電導層を成膜した。1-pass 線速は 40 ~ 80 m/h とし、所定の膜厚を狙って繰り返し成膜を行った。超電導層上には Ag を約 10 μm スパッタ蒸着した後、大型電気炉によって酸素気流中でアニールをした。得られた線材の臨界電流特性の評価は、4 端子法による通電測定(閾値 1 $\mu V/cm$)、あるいはホール素子による磁化測定を液体窒素中(77 K)で行った。

3. 結果および考察

高 I_c を有する長尺線材の作製技術確立のため、試作的に 10 m 長の厚膜線材を作製した。その線材の 70 cm 間隔における臨界電流特性を Fig. 1 に示す。GdBCO の膜厚 4.8 μm において $I_{c(min.)} = 763$ A, $I_{c(max.)} = 894$ A という非常に高い特性が得られた。また 4.8 μm という厚膜ではあるが、ハンドリングによる剥離も生じなかったことから、実用レベルの長さである数 100 m 長においてもこのような厚膜での高 I_c 線材を作製できる見通しがたった。

Fig. 2 には 2009 年 11 月から 2010 年 2 月にかけて作製した長尺線材の中で、外観において 1 mm 以上の欠陥部が見られた部分間の平均長さ、その典型的な欠陥の外観写真を示す。欠陥はテープ幅方向に占める割合が大きいほど I_c を低下させることから、歩留に影響を与える。2010 年から欠陥の発生頻度が大きく低減してきているが、これは典型的な欠陥が主としてダストの上に成膜することで発生していたため、基本的ではあるが基板の洗浄などを強化することで欠陥発生を抑制できたためである。このような対策で単長 50 m において $I_c > 300$ A/cm が得られる歩留は 80% 以上に達した。

Fig. 3 には 2010 年になって作製した 320 m 長線材の磁化法による I_c 測定結果を示す。平均 I_c は約 500 A であり、全長に渡って I_c のばらつきが小さい均一な特性が得られた。線材作製において律速になるプロセスは PLD であるが、本線材の PLD における製造速度は 26.6 m/h と高速であり、長尺線材の量産技術は着実に進歩してきている。

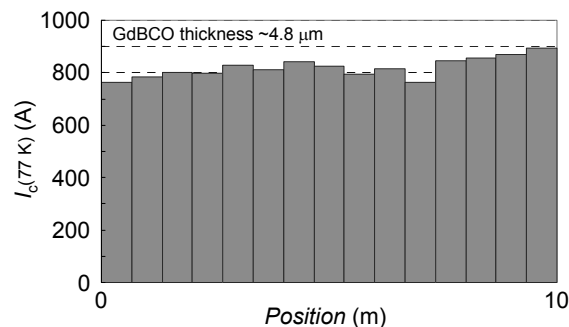


Fig. 1 Longitudinal I_c distribution of a 10 m-long GdBCO tape measured by current-conduction.

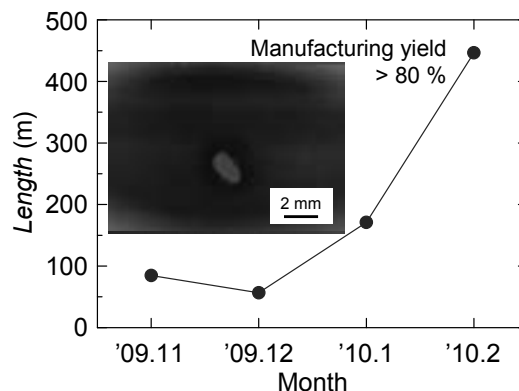


Fig. 2 Mean lengths of long GdBCO tapes without defects fabricated from 2009.11 to 2010.2. Inset is the photo of a typical defect.

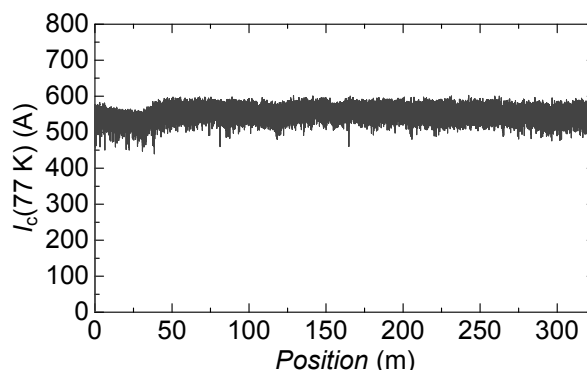


Fig. 3 Longitudinal I_c distribution of a 320 m-long GdBCO tape measured by magnetization-profiles.

4. 謝辞

本研究は経済産業省の「イットリウム系超電導電力機器技術開発」として独立行政法人「新エネルギー・産業技術総合開発機構」からの受託により実施された。

参考文献

[1] M Igarashi et al., Abstracts of CSJ Conference, Vol.80 (2009)p186

In-plume PLD 法 GdBCO 線材の磁場中 I_c 特性と磁束ピン止め機構

In-field I_c characteristics of GdBCO coated conductors prepared by in-plume PLD method and possible pinning mechanism

筑本 知子, セルゲイ・リー (ISTEC); 加藤 丈晴, 平山 司 (JFCC); 田辺 圭一 (ISTEC)

CHIKUMOTO Noriko, LEE Sergey (ISTEC), KATO Takeharu, HIRAYAMA Tsukasa (JFCC); TANABE Keiichi (ISTEC)

E-mail: chiku@istec.or.jp

1. はじめに

我々は、基板-ターゲット間距離を短くして成膜する in-plume PLD 法の開発を行っており、GdBCO 系において I_c 値が 200A/cm-w 以上の均一長尺線材 (>50m) を再現性良く得られるまでになっている[1]。なお、ここで I_c 値は製造速度により線材の膜厚を変えることで、制御可能である[2]。

一方、SMES や超電導磁石等の機器応用においては、 I_c の磁場強度及び磁界角度依存性が重要なパラメーターとなってくる。前回の報告で、IBAD-MgO 基板上に reel-to-reel (RTR) 成膜した GdBCO 線材の 77K における I_c の磁界角度 (Θ) 依存性に、 $\Theta=180^\circ$ ($B_a//c$)、 90° ($B_a//ab$)、及び $90^\circ \pm 10^\circ$ で I_c 値のピークが見られることを報告した。今回の報告では、この複数のピーク構造について、それぞれのピークの生じる機構を明らかにすることを目的に、製造条件の影響の把握、及び断面 TEM 観察等を行い、その起源について検討を行った結果について述べる。

2. 実験方法

成膜には $\text{CeO}_2/\text{LaMnO}_3/\text{IBAD-MgO}/$ ハステロイ基板 (IBAD-MgO 基板) ($\Delta\phi=4-5^\circ$) を用いた。GdBCO 層は XeCl エキシマレーザー (レーザーパワー: $\sim 650\text{mJ}$) を用いて、in-plume 条件でマルチプルルーム-マルチターン (MPMT)-RTR 成膜を行なった。なお、酸素分圧、温度は一定とし、基板の搬送速度 (線速) を 20~80m/h の範囲で変化させた。

成膜には Gd:Ba:Cu=1:1.8:3 の組成比のターゲットを用いた。得られた膜の Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES) 法による分析組成は線速によらず、ほぼ $\text{Gd}_{1.1}\text{Ba}_{1.9}\text{Cu}_3\text{O}_y$ であった。作製したテープは Ag を 10 μm 程度スパッタ蒸着後、酸素気流中でアニール処理を行った。磁場中 I_c 測定は液体窒素冷却下四端子法で行い、磁場はスプリットコイルを用いて印加した。 I_c 値は 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ の電圧基準により決定した。

3. 実験結果

Fig. 1 に線速 20m/h で RTR 成膜した sample #1 と 60m/h で成膜した sample #2 の I_c の磁界角度依存性を示す。Sample #2 と比較して、sample #1 は $\Theta=180^\circ$ ($B_a//c$) のピークが顕著である一方、 90° ($B_a//ab$) ピークの左右のサイドピークがほとんど現れない。様々な線速で作製したテープについて、同様の測定を行なったところ、線速が大きくなる程、サイドピークが現れやすい傾向にあった。

このサイドピークの起源を明らかにするため、それぞれの試料の断面 TEM 観察を行なった。高倍率の TEM 像を Fig. 2 に示すが、sample #2 では高密度に積層欠陥が ab 面方向 (水平方向) にみられることがわかる。このことから、サイドピークはこの高密度積層欠陥によるピンによる可能性が高いと考えられる。

4. 謝辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として実施したものである。なお、本研究で用いた

IBAD-MgO 基板の提供いただきました、ISTEC の線材研究開発部の皆様に感謝致します。

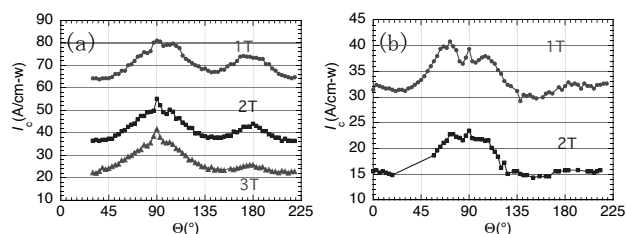
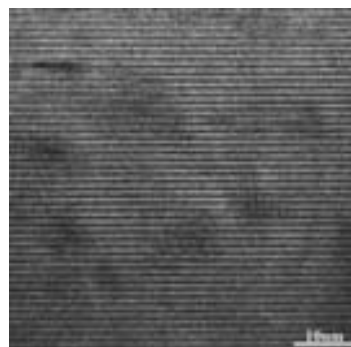
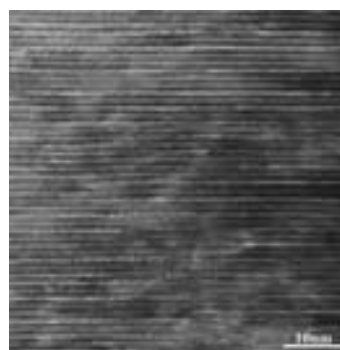


Fig.1 Field angular dependences of I_c for (a) sample #1 and (b) sample #2.



(a)



(b)

Fig.2 TEM cross sections of (a) sample #1 and (b) sample #2.

参考文献

1. N. Chikumoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.116
2. N. Chikumoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p.14

コンビナトリアル Nd:YAG-PLD 法による ピンニング材料ドーピング YBCO 膜の高速最適化

High-throughput optimization of pinning material-doped YBCO films by combinatorial Nd:YAG-PLD method

一野 祐亮, 吉田 隆, 吉村 拓也, 金沢 由樹, 高井 吉明(名大);
吉積 正晃, 和泉 輝郎, 塩原 融(SRL)

ICHINO Yusuke, YOSHIDA Yutaka, YOSHIMURA Takuya, KANAZAWA Yuki, TAKAI Yoshiaki (Nagoya Univ.);
YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL)
E-mail: ichino@nuee.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

これまで、4 倍波 Nd:YAG レーザーを用いた PLD 法 (Nd:YAG-PLD 法) によって、単結晶基板や IBAD-MgO 中間層を持つ金属基板上に YBCO 薄膜を作製し、その超伝導特性を評価した。その結果、 $T_c \sim 90$ K、 $J_c > 1$ MA/cm²@77 K として、 $J_c = 190$ A/cm-w@77 K、1.8 μ m 厚が得られ、Nd:YAG-PLD 法が YBCO 膜作製プロセスとして有効であることを示した [1]。YBCO 線材のコイル応用を想定した場合、磁場中 J_c 向上のためには、YBCO 膜へのピンニング材料の添加が有効である。しかし、過剰な添加は J_c の低下を招くため、最適添加量の探索が必要である。

本稿では、コンビナトリアル Nd:YAG-PLD 法を用いて、ピンニング材料である BaSnO₃(BSO) 添加量の異なる YBCO 膜を一枚の基板上に一度に作製・評価することで、ピンニング材料の最適添加量の高速探索に関する検討を行った。

2. 実験方法

4 倍波 Nd:YAG レーザー(波長 266 nm)を用いて、MgO 単結晶基板および、CeO₂ / LaMnO₃ / IBAD-MgO / Gd₂Zr₂O₇ / Hastelloy (IBAD-MgO) 上に YBCO 薄膜を作製した。基板温度 900°C、酸素圧力 0.2 Torr、基板-ターゲット間距離 40 mm としてレーザーエネルギー密度 1.8 J/cm² で成膜を行った。Fig. 1 にコンビナトリアル Nd:YAG-PLD 法の概略図を示す。YBCO と BSO ドープ YBCO ターゲットを用いて、数モノレイヤーの厚みで積層膜を作製する。その際に、パターンプレートをを用いてそれぞれの層の膜厚を傾斜させることで、Fig. 1(b) のように組成を傾斜させた試料を作製することができる。これによって、BSO 添加量が 0~数 wt% まで連続的に変化する試料を一回の実験で作製可能である。

作製した薄膜の配向性・結晶性は X 線回折法(XRD)として超伝導特性は磁場中直流四端子法を用いて評価した。また、BSO 添加量は SEM に付随したエネルギー分散型 X 線分光器(EDX)を用いて評価した。

3. 実験結果及び考察

XRD パターンにおいて、YBCO と BSO 添加 YBCO のピークが分かれて観測されることはなかった。また、

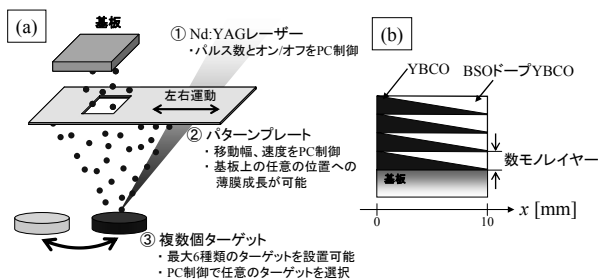


Fig. 1 Schematic drawing of combinatorial Nd:YAG-PLD method. (a) Apparatus and (b) an example of film (cross-sectional view).

BSO 添加量の増加に対して YBCO の c 軸長が伸張していることがわかった。この傾向は、Mele らによって報告された BSO 添加 YBCO 薄膜の傾向と同様である [2]。以上から、YBCO と BSO 添加 YBCO が固相内拡散によって混合していると考えられる。これらの試料の T_c は、添加量増加に伴って低下した。

Fig. 2 にこれらの試料の不可逆磁場曲線を示す。図より、BSO 添加量が約 5wt% までは、添加量に伴って不可逆磁場曲線の傾きが大きくなるが、それ以上では逆に低下する傾向が見られた。これは BSO が c 軸相関ピンとして働いているためと考えられる。

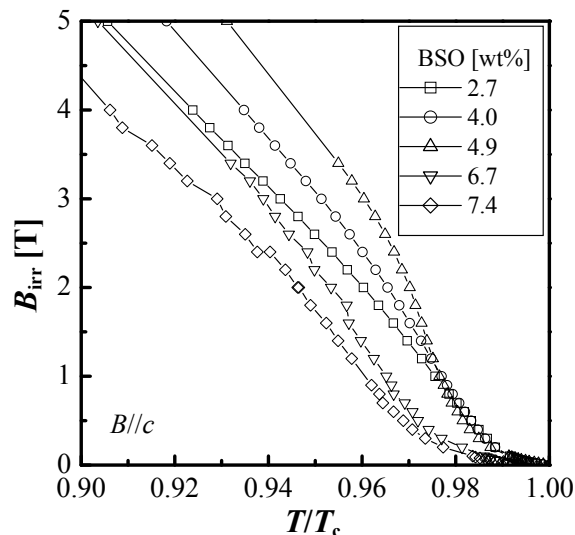


Fig. 2 Irreversibility lines of BSO doped YBCO films prepared by combinatorial PLD method.

4. まとめ

コンビナトリアル Nd:YAG-PLD 法を用いて BSO 添加量を変化させた YBCO 膜を一度に作製し、最適添加量探索の高速化に関する検討を行った。BSO 添加量が連続的に変化する YBCO 膜を一枚の基板上に作製することに成功した。YBCO の c 軸長は BSO 添加量増加に従って増加し、不可逆磁場曲線の傾きも 5wt% までは上昇する傾向が見られた。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(20686065, 19676005)の助成と、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託を受けて実施したものである。

参考文献

- Y. Ichino, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p.19
- P. Mele, et al.: Physica C, Vol. 469 (2009) p. 1380

市販 YBCO 薄膜・テープの J_c の磁界角度依存性と磁束ピン止めMagnetic-field angle dependent J_c and flux pinning in commercial YBCO thin films and tapes

山崎 裕文(産総研); 李 潤錫, 玉田 紀治(前川); 古瀬 充穂, 淵野 修一郎(産総研)

YAMASAKI Hirofumi(AIST); LEE Yoonseok, TAMADA Noriharu (Mayekawa); FURUSE Mitsuho, FUCHINO Shuichiro (AIST)

E-mail: h.yamasaki@aist.go.jp

1. はじめに

我々は、これまでに、市販の YBCO 薄膜 (THEVA 社製共蒸着法薄膜)、テープ線材 (SuperPower 社製 MOCVD 法テープ、及び、American Superconductor 社製 MOD 法テープ) の液体窒素温度での磁界角度依存性 $J_c(H, \theta)$ を測定し、 $H // ab$ のまわりの富士山型の J_c ピークや、それよりも鋭い山型のピークを観測してきた [1, 2]。ごく最近、山崎らは、フッ素フリー MOD 薄膜に高濃度で存在する積層欠陥は面状ピンでなく、積層欠陥と YBCO マトリクスとの界面に生成する転位が ab 平面内の線状ピンとなる、と言う新しい解釈で、その磁束ピン止め機構を説明した [3]。この新しい知見を元に考察し、市販の薄膜・テープは、微細ナノ析出物がピンとなる試料 (富士山型) と積層欠陥周辺部の転位がピンとなる試料 (鋭い山型) の二つに大別されること、磁界角度依存性の温度変化もこの考察を支持することを報告する。

2. MOCVD-YBCO テープの J_c の磁界角度・温度依存性

SuperPower 社製 MOCVD-YBCO テープの磁界角度依存性 $J_c(H, \theta)$ を輸送法 (通電法) で測定した所、 $H // ab$ を中心とした山型の J_c ピークを示した (図 1a, b)。このような $J_c(\theta)$ は小さなランダムピン (半径がコヒーレンス長 ξ 以下の点状欠陥) が主体となる場合に多く見られるが、小さなランダムピンのみによるときは、 $\alpha(\theta) = (\cos^2\theta + \sin^2\theta/\gamma^2)^{1/2}$ を用いて、 $J_c(H, \theta) = J_c(\varepsilon H)$ と、 εH のみの関数となる [1]。図 1a, b の $J_c(H, \theta)$ データについて J_c を εH に対してプロットすると、各磁界で計算された $J_c(\varepsilon H)$ 曲線のうち、ランダムピンのみによる $\sim 6^\circ < |\theta - 90^\circ| \leq 15\text{--}20^\circ$ の部分は、なめらかにつながった (図 1c, d)。このスケール挙動は 80 K, 60 K とも同様であり、この薄膜の $J_c(\theta)$ が主に小さなランダムピンによること、 ab 平面相関ピンの寄与も大きいことがわかった。

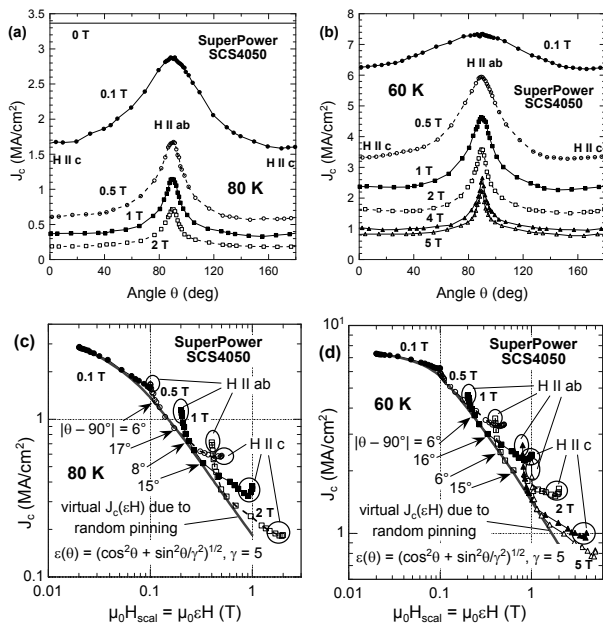


Fig. 1 Magnetic-field angle dependence of J_c in a 4-mm-wide MOCVD-YBCO tape at (a) 80 K and (b) 60 K. The scaling analyses of small random pins at (c) 80 K and (d) 60 K.

2. THEVA 社製共蒸着法 YBCO 薄膜の $J_c(H, \theta, T)$

サイズが約 7 nm 以下の非常に微細な析出物が多数観察された共蒸着法 YBCO 薄膜の $J_c(H, \theta)$ とスケール解析を図 2 に示す。80 K においては、富士山型の $J_c(H, \theta)$ ときれいなスケール挙動、強いピンに対する直接モデルから予想される $J_c(\varepsilon H) \sim 1/H$ が観測されたが、60 K では $J_c(\theta)$ 曲線がなだらかになり、スケールが成立しなかった。80 K ではナノ析出物が $2\xi_{ab} \approx 11$ nm より小さかったが、 $\xi \sim 1/(1 - T/T_c)^{1/2}$ の温度依存性で 60 K の $2\xi_{ab}$ が 5-6 nm と短くなり、 ≤ 7 nm の析出物が小さなランダムピンと見なせなくなるからである。

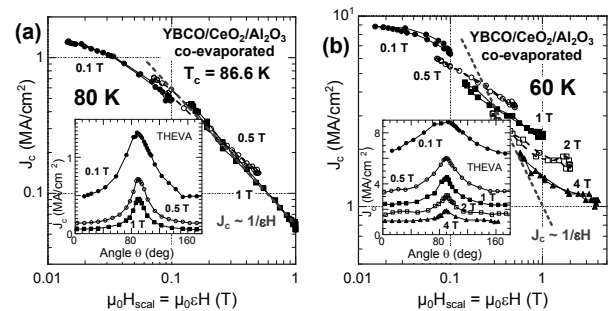


Fig. 2 The scaling analyses of small random pins for a co-evaporated YBCO thin film at (a) 80 K and (b) 60 K. The $J_c(H, \theta)$ data are shown in the insets.

3. 積層欠陥周辺部の転位による磁束ピン止め

フッ素フリー MOD 薄膜では、図 1a, b に示すような鋭い山型の $J_c(H, \theta)$ と図 1c, d と同様のスケール挙動が観測されるとともに、透過電顕で高濃度の積層欠陥 ($// ab$) が観察された [3]。積層欠陥は面状ピンでなく、それと YBCO マトリクスとの界面に生成する転位が ab 平面内の線状ピンとなる、と言う新解釈で、線状ピンが電流方向と垂直なときには ab 平面相関ピンとなり、それ以外の時には小さなランダムピンと等価となることから、図 1 の $J_c(H, \theta)$ を説明できる (図 3)。MOCVD-YBCO テープでも積層欠陥周辺部の転位が線状ピンとなり、その直径は充分小さく、60 K で 2ξ 以下であると考えられる。

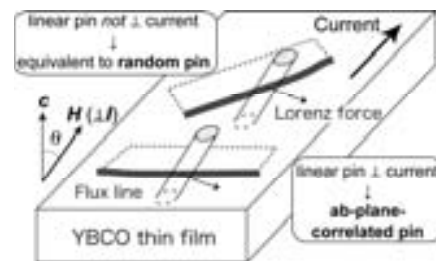


Fig. 3 Illustration showing the flux pinning effect of linear pinning centers (dislocations) parallel to the ab -plane.

参考文献

1. H. Yamasaki, K. Ohki, H. Yamada, N. Nakagawa and Y. Mawatari: Supercond. Sci. Tech., Vol. 21 (2008) p. 125011
2. Y. Lee, H. Yamasaki and M. Furuse: J. Cryo. Soc. Jpn, Vol. 44 (2009) p. 558
3. H. Yamasaki, et al.: presented at the 57th Spring Meeting of the Japan Society of Applied Physics, March 18, 2010.

TFA-MOD 法による低コスト YBCO 線材の開発(10)

- TFA-MOD YBCO 線材量産化の進捗 -

Development of the low cost YBCO coated conductor using TFA-MOD process (10)

- Progress on mass production of YBCO coated conductor using TFA-MOD process -

小泉 勉, 木村 一成, 中西 達尚, 青木 裕治, 青木 伸夫, 長谷川 隆代 (昭和電線ケーブルシステム)

飯島 康裕, 齊藤 隆 (フジクラ)

高橋 保夫, 吉積 正晃, 町 敬人, 中尾 公一, 和泉 輝郎, 塩原 融 (ISTEC-SRL)

KOIZUMI Tsutomu, KIMURA Kazunari, NAKANISHI Tatsuhiisa, AOKI Yuji, AOKI Nobuo, HASEGAWA Takayo (SWCC-CS)

IJIMA Yasuhiro, SAITOH Takashi (Fujikura)

TAKAHASHI Yasuo, YOSHIZUMI Masateru, MACHI Takato, NAKAO Koichi, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL)

t.koizumi576@cs.swcc.co.jp

1. はじめに

近年、電力送電ケーブルや変圧器等の電力機器に高温超電導線材を用いた開発が、精力的に行われている。中でも、RE-123 超電導体は液体窒素温度中での磁場特性が優れているため、線材化に向けた開発が多くの機関で進められている。

我々は、低コストプロセスとして位置づけられている TFA-MOD 法により作製される Y-123 線材の実用化を目指し、特性向上及び長尺化、製造速度の高速化等の検討を行ってきた。RE-123 線材の産業応用を考えた場合、線材価格の低価格化だけでなく、均一性の向上を含めた開発を行なっていく必要がある。

本報では、Y-123 超電導長尺線材の開発状況、及び長手方向の均一性の調査結果について報告する。

2. 実験方法

出発原料に、トリフルオロ酢酸塩 (Y-, Ba-)、及びナフテン酸塩 (Cu-) を用い、金属元素組成比 Y:Ba:Cu=1.0:1.5:3.0 として混合した原料溶液を、Hastelloy™ C-276/Gd₂Zr₂O₇ (IBAD)/CeO₂(Sputtering) の構造を持つ幅 5mm の金属基板上に Reel-to-reel (RTR) 式塗布・仮焼装置を用い、10 m/h の速度で前駆体膜を形成し仮焼テープとした。その仮焼テープをバッチ式焼成炉により、水蒸気を含む減圧低酸素雰囲気中、最高到達温度 750°C の条件下で本焼を行った。その後、Ag 安定化層を形成し、酸素雰囲気中においてポストアニールを行った。

長尺線材の特性分布は、直流四端子法及びホール素子法により液体窒素中において評価を行なった。尚、通電法による I_c 値は電圧基準 0.5 μ V/cm で定義した。

3. 結果

Fig. 1 に平成 21 年度に提供を行なった線材の各月毎の累積長を示す。図に示すように、21 年度は $I_c > 100$ A の線材を総長でおよそ 2,500m の提供を行ない、歩留りは 70% であった。更なる歩留り改善の一つとして、特性低下を引き起こす欠陥について今回調査を行った。

Fig. 2 に作製した線材より $I_c > 100$ A の部分 2m を任意に抜き出し、ホール素子法により I_c 分布について調査を行った結果を示す。また、図中太線で示したものは、通電法により得られた I_c 値である。図に示すように、3箇所ほど大きな欠陥が存在することが認められた。これにより I_c 値の大きな低下のない領域においても欠陥が存在することが判った。本調査の詳細については当日報告する。

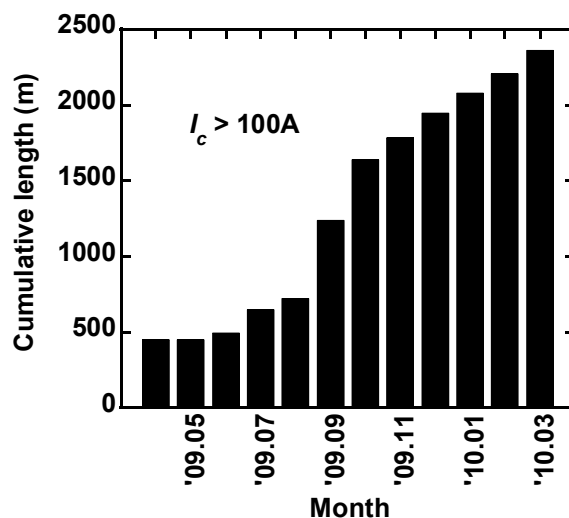


Fig. 1 Cumulative length of the YBCO tapes supplied for the project of Materials and Power Application of Coated Conductors.

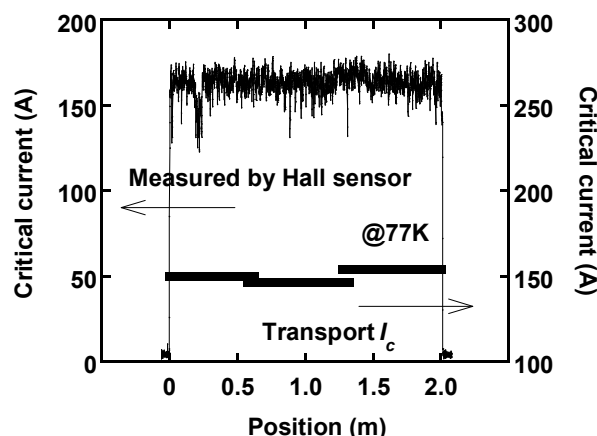


Fig. 2 Distribution of the critical current of the YBCO tape.

謝辞

本研究は、「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として、新エネルギー産業技術総合開発機構 (NEDO) からの委託を受け実施したものである。

BaZrO₃ ナノ粒子の分布による TFA-MOD 線材の磁場中特性変化Effect of BaZrO₃ nano particles distribution on Jc-B-theta property of TFA-MOD derived coated conductors

吉積 正晃, 三浦 正志, 松岡 和洋, 和田 圭介, 高木 裕司, 和泉 輝郎, 塩原 融(超電導工学研究所)

YOSHIZUMI Masateru, MIURA Masashi, MATSUOKA Kazuhiro, WADA Keisuke, TAKAGI Yuji, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL)

E-mail: myoshizumi@istec.or.jp

1. はじめに

TFA-MOD (Metal Organic Deposition using Trifluoro Acetates) 法は低コストで高い特性が得られる手法であるため、将来の実用化線材作製プロセスとして期待されている。TFA-MOD法における開発の課題は、コスト削減のための製造速度向上と高臨界電流密度(Jc)化、磁場中応用のための磁場中特性向上に大別される。磁場中特性の向上のためには、磁場中でのJc特性の異方性を抑制し、Jc特性の低下を抑制するため磁束のピン止め点導入が必要である。Zr 塩を添加した原料溶液を用いる事により、微細な BaZrO₃(BZO) 粒子を試料中に均一に分散させ、磁場中特性を向上させる事に成功した[1]。本研究では、BZO 粒子の分布を制御する事により、Jc 特性の異方性の抑制と Jc 値の更なる向上に成功し、約 0.9 μ m 厚で 14A/cm 幅@77K,3T の高い Ic(min)特性を得たので、報告する。

2. 実験方法

RE-TFA(RE:Y, Gd)、Ba-TFA、Cu-ナフテン酸塩からなる出発原料を Y:Gd:Ba:Cu=1:0.3:2:3.5 組成 (Ba-deficient) になるよう混合し、更に金属比で 1~3wt% の Zr 塩を混合して有機溶媒に溶かし、出発原料溶液とした。この原料溶液を PLD-CeO₂/Sputter-LaMnO₃/IBAD-MgO/Sputter-Gd-Zr-O/ハステロイ™ 基板 ($\Delta \phi_{\text{CeO}_2} = \sim 4^\circ$) 上にスピコートにより塗布して 500°C、酸素雰囲気中で仮焼し、前駆体膜を得た。所定の膜厚 (~0.9 μ m) を得るため、塗布・仮焼プロセスを繰り返した後、760°C、500ppm酸素雰囲気中で本焼成した[1]。得られた試料は Ag 安定化層蒸着、酸素熱処理の後、4端子法により磁場中での Ic 及び Jc 特性の磁場印加角度依存性を評価し、ICP により膜厚を測定、XRD、TEM により微細組織の評価・観察を行った。

3. 結果及び考察

図1に作製された YGdBCO(+BZO) 線材の 77K における異なる磁場(自己磁場、1T、3T)中での Jc(min)特性の Zr 量依存性を示す。自己磁場下では、Zr 未添加の 2.6MA/cm² に比べて Zr 添加試料は全て1割以上高い特性を示したが、Zr 添加量による有意な変化は見られなかった。一方、磁場中においては、Zr 添加量に伴う変化が明確に見られ、Zr 添加量が増えるに伴い、Jc(min)の値も上昇する傾向にあった。最も高い Jc(min)特性を示した 3wt%添加の試料では、約 0.9 μ m 厚で 14.1A/cm@77K,3T の Ic(min)を得た。

添加された Zr 塩は、仮焼・本焼により Ba と化合し、BZO を形成して試料中に直径 20nm 程度の微細な球状粒子として分散する事がこれまでの 1wt%試料を用いた TEM 及び XRD の分析結果により確認されている[1]。3wt.%添加のケースでも、ジルコニアのピークは確認されず、Zr 添加量に伴う BZO のピークの伸長が見られた事から、試料中のほぼ全ての Zr が BZO を形成していると考えられる。ここで、Zr 添加量の増加に伴い、BZO の量が増える事は、超電導相を形成するための Ba 量を減らし、超電導相の体積分率を低下させ、特性低下の原因となり得る。添加された Zr が全て BZO を形成した場合、本研究における最大 Zr 添加量である 3wt.%組成時の残りの部

分の組成は金属比で RE:Ba:Cu=1:1.34:3 程度になる。これは Ba-deficient にする事により高 Jc が得られる効果が維持される限界に近い値であり、自己磁場での Jc 特性が維持されている事からも、超電導体の体積分率が低下する影響は本研究における Zr 添加範囲では限定的である事が分かる。

また、BZO の増加は BZO ナノ粒子の数の増加あるいは粒径の増加を意味するが、TEM 観察により BZO 粒子サイズは 1wt%の試料において約 20nm であり、コヒーレンス長よりも大きいため、Zr 添加量の増加により BZO 粒子が粗大化した場合には図1の結果に見られるようなピンニング力の効果的な増加は説明し難い。従って、Zr 添加量は、主として BZO ナノ粒子の数に影響しており、高 Zr 量での磁場中での特性向上は、磁束のピン止め点として作用する BZO ナノ粒子の数が増加した事によるものと理解される。

Zr 添加により Jc 特性の磁場印加角度依存性も変化し、低磁場では Zr 添加量の増加に伴い磁場印加角度による Jc 特性の異方性が抑制される傾向が確認された。

本研究の結果から、更なる Zr 添加による特性向上も期待されるが、Zr 添加に伴い BZO 形成量が増えるため、Zr 添加量の最適化には Ba 組成を含めた検討が不可欠である。今後 Ba 組成を含めた組成の最適化を進めると共に、より微細に分散し、効果的なピン止め点として作用する材料の検討を行い、更なる磁場特性の向上につなげていく予定である。

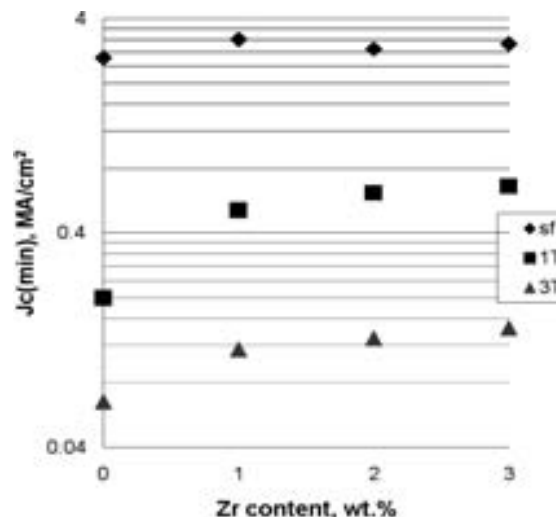


Fig.1 Zr content dependence of Jc (min) of YGdBCO (+BZO) at 77K under magnetic fields

4. 謝辞

本研究はイットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、新エネルギー産業技術総合開発機構 (NEDO) からの委託を受け実施したものである。

参考文献

1. M. Miura, et al.: Appl. Phys. Express 1 (2008) p.051701

ナノ粒子を導入した TFA-MOD 法 YGdBCO 線材における磁束ピンニング特性

Flux pinning properties in TFA-MOD processed YGdBCO coated conductor with nanoparticles

鯉田 貴也, 松谷 文也, 高橋 祐治, 木内 勝, 小田部 莊司, 松下 照男 (九工大);
三浦 正志, 和泉 輝郎, 塩原 融 (国際超電導産業技術研究センター)

KOIDA Takaya, MATSUTANI Fumiya, TAKAHASHI Yuji, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji,
MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);
MIURA Masashi, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL)
E-mail : koida@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

REBCO 線材 (RE:希土類) は、高温、高磁界で高い臨界電流密度が得られることから電力機器への利用が有望視されている。実用化に向けての臨界電流密度 J_c の更なる特性改善が求められており、特に臨界電流密度が高く、印加磁界角度に対する異方性の小さな線材が要求される。これまでの研究で YBCO 線材では c 軸方向に平行に磁界を印加したとき、超電導膜の厚さによって臨界電流特性が異なる振る舞いを示す事が報告されている [1]。しかし、ナノ粒子の印加磁界角度による臨界電流特性と膜厚依存性への影響について詳細は報告されていない。本研究では、ナノ粒子の導入によるコート線材の臨界電流密度の印加磁界角度依存性を測定し、このナノ粒子の臨界電流密度の異方性と膜厚依存性への影響について詳細に調べた。

2. 実験

測定した試料は、超電導膜厚 $0.5 \mu\text{m}$ と $0.7 \mu\text{m}$ の TFA-MOD 法によって作製された膜厚の異なる BZO ナノ粒子なし (#1, #2) とあり (#1p, #2p) の 4 つの YGdBCO (Y:Gd = 0.77:0.23) 線材である。Table 1 にそれらの諸元を示す。直流四端子法による J_c 測定を行うために、線材を幅 $w = 50 \mu\text{m}$ 、長さ $l = 0.8 \text{ mm}$ (#2 のみ $l = 1.0 \text{ mm}$) のマイクロブリッジ形状に加工した。磁界は $0\text{--}3 \text{ T}$ の範囲で印加し、 c 軸方向からの角度を θ とした。 J_c は $E_c = 4.5 \times 10^{-3} \text{ V/m}$ の電界基準で決定した。尚、温度誤差は $\pm 0.3 \text{ K}$ であった。

3. 結果及び検討

Fig. 1 に膜厚 $0.5 \mu\text{m}$ の人工ピンなしとありの 77 K における $J_c\text{-}\theta$ 特性を示す。 ab 面磁界方向で一般的な異方性に伴うピークが見られるが、BZO ナノ粒子の導入により J_c 値が全体的に向上している。これはナノ粒子のような等方的なピンの導入によるもので、 $\theta = 90^\circ$ 近傍以外の角度領域では、このナノ粒子が有効に作用することがわかる。一方、 $\theta = 90^\circ$ 近傍では #1 の方が J_c 値が大きくなっている。これは、 ab 面に平行な積層欠陥の成長が、BZO ナノ粒子導入によって抑えられていることが原因として考えられる。次に Fig. 2 に膜厚 $0.5 \mu\text{m}$ と $0.7 \mu\text{m}$ の厚さの異なる人工ピンありの試料の 80 K 、 2 T における $J_c\text{-}\theta$ 特性を示す。#1p と #2p の J_c 値を比較してみると、膜厚の厚い #2p のほうが高い値を示しており、より膜厚の厚い試料のほうが良い J_c 特性であることがわかる。これは膜厚が厚いほうが 3次元ピンニングになりやすいためであると考えられる。これらの結果を磁束クリープ・フローモデルを用いて解析を行うとともに、ナノ粒子によるピンニング機構について定量的に議論する。

Table 1: Specification of specimens

specimen	thickness d (μm)	T_c (K)	process
#1	0.5	90.0	MOD
#1p	0.5	90.2	MOD+BZO
#2	0.7	90.8	MOD
#2p	0.7	89.8	MOD+BZO

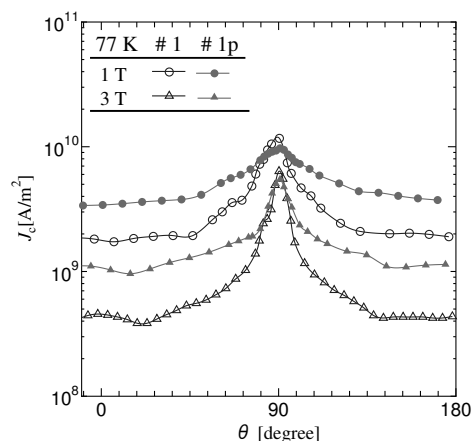


Fig. 1: $J_c\text{-}\theta$ properties at 77 K for specimens #1 and #1p.

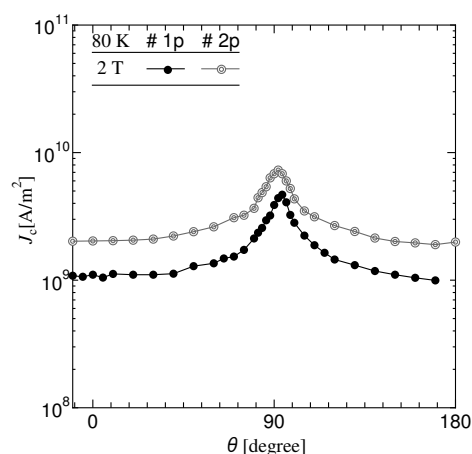


Fig. 2: $J_c\text{-}\theta$ properties at 80 K and 2 T for specimens #1p and #2p.

4. 参考文献

[1] 高橋ら: 第 81 回低温工学・超電導学会講演概要集 1P-p18(2009)

謝辞 本研究は、ISTEC を通じて NEDO からの委託を受けて実施したものである。

低磁性クラッドタイプ配向金属基板の開発 Development of low magnetic clad-type substrates

大木 康太郎、山口 高史、永石 竜起、林 和彦(住友電工)
岡山 浩直、南部 光司(東洋鋼鈑)

OHKI Kotaro, YAMAGUCHI Takashi, NAGAISHI Tatsuoki, HAYASHI Kazuhiko (SEI)
OKAYAMA Hironao, NANBU Kouji (TOYOKOHAN)
E-mail: ohki-kotaro@sei.co.jp

1. はじめに

超電導ケーブル、超電導マグネット等の応用に向けた $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (RE: 希土類元素) 系超電導線材の開発を行っている。安価で高性能な超電導線材を得るための金属基板として、高強度かつ低磁性の特徴をもつクラッドタイプの配向金属基板を住友電工と東洋鋼鈑で共同開発してきた[1]。

本基板は、Ni/Cu/SUSで構成され、Ni-W合金基板に比べて高強度である。ヒステリシス損失も 1/25 程度と小さく、交流応用などにも適する。X線回折測定による極点図測定から全長においてCu、Ni層共に2軸配向していることを確認できている。

2. クラッド基板の構成

Ni/Cu/SUSで構成されるクラッド基板はCu箔とSUS基材をクラッドした後に、めっき法によりエピタキシャル成長したNi層を形成する。本基板は幅550mm幅×単長2000m長以上を作製可能である。

3. クラッド基板の諸特性

クラッド基板のCu層、Ni層をXRDで評価したところ、ピーク強度比 $I(100)/\{I(111)+I(100)\}$ は99%以上である(Fig.1)。Cu層、Ni層の面内配向度 $\Delta\phi$ (ピーク半値幅 FWHM) は種々の改善を施し、現状では 4.5° 程度まで低減することができた(Fig.2)。

Figure 3にNiめっき層表面のSEM像を示す。SEMによる表面観察によると、Cu箔に起因する結晶粒の大きさは $150\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 程度であり、圧延方向に伸びた形をしている。AFMによる表面粗度の評価では、粒内のRaは10nm以下であり平滑であったが、粒間の凹凸は100nm以上ある箇所もみられ、今後、改善が必要である。

3. まとめ

安価で高強度かつ低磁性のクラッド基板を開発した。本クラッド基板は、Cu層、Ni層ともに良好な2軸配向を有する。安価で高機能な超電導用基板として有力な候補となると期待している。

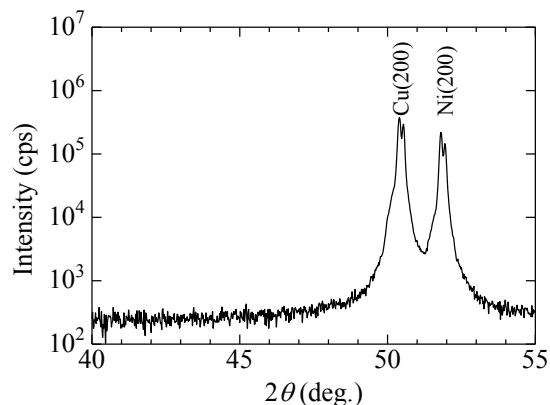


Fig.1 X-ray diffraction pattern of the clad-type substrates.

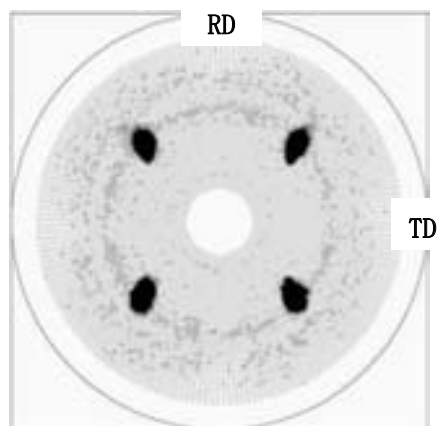


Fig.2 XRD pole figure of Ni (111) of the clad-type substrates.

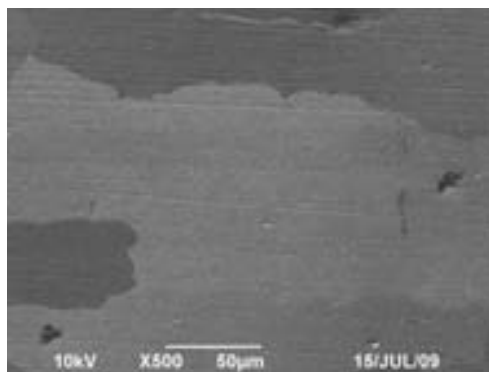


Fig.3 SEM image of the Ni surface of the clad-type substrates.

参考文献

1. 特開 2006-127847